

POWERED BY Dialog

10.0776.003  
09.12.2003

Josephson tunnel element mfr. - using aperture mask technique and inert counter electrode  
Patent Assignee: SIEMENS AG  
Inventors: DAALMANS G; HOENIG H E

**Patent Family**

Patent Number	Kind	Date	Application Number	Kind	Date	Week	Type
DE 3128982	A	19830210				198307	B
DE 3128982	C	19851212				198551	

Priority Applications (Number Kind Date): DE 3128982 A ( 19810722)

**Patent Details**

Patent	Kind	Language	Page	Main IPC	Filing Notes
DE 3128982	A		23		

**Abstract:**

DE 3128982 A

Josephson tunnel element for logic and memory circuits is produced by depositing on a substrate the superconductive layer of a base electrode, a superconductive counter electrode with very little tension relaxation and at least as high a jump temp. as niobium, and a tunnel barrier layer between the electrode layers.

The electrodes are deposited in a vacuum technique by oblique vapour deposition, interrupted by applying the tunnel barrier. The aperture mask on the substrate has an aperture structure to suit the desired tunnel element.

Simple method of producing Josephson tunnel elements with small leakage currents.

5/14

Derwent World Patents Index

© 2003 Derwent Information Ltd. All rights reserved.

Dialog® File Number 351 Accession Number 3655045



①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Off nlegungsschrift  
⑪ DE 3128982 A1

⑤① Int. Cl. 3:  
H 01 L 39/24  
H 01 L 27/18  
G 11 C 11/44  
H 03 K 19/195

②① Aktenzeichen:  
②② Anmeldetag:  
②③ Offenlegungstag:

P 31 28 982.7-33  
22. 7. 81  
10. 2. 83

⑦① Anmelder:  
Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München, DE

⑦② Erfinder:  
Daalmans, Gabriel M. Dipl.-Ing.; Hoenig, H. Eckhardt,  
Dipl.-Phys. Dr., 8520 Erlangen, DE

DE 3128982 A1

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ »Verfahren zur Herstellung mindestens eines Josephson-Tunnelelementes«

Mit dem Verfahren soll mindestens ein Josephson-Tunnelelement herzustellen sein, das auf einem Substrat abgeschiedene supraleitende Schichten einer Basiselektrode und einer Gegenelektrode sowie eine Schicht einer Tunnelbarriere zwischen den Elektroden enthält. Bei dem Verfahren werden in einem ununterbrochenen Vakuumprozeß die Schichten der Elektroden mit Hilfe einer Maskentechnik durch schräges Aufdampfen aufgebracht und wird zwischendurch die Schicht der Tunnelbarriere ausgebildet. Gemäß der Erfindung wird auf dem Substrat (4) eine Lochmaske (12) mit vorbestimmter Dicke (1) mit einer dem zu erzeugenden Tunnelelement angepaßten Lochstruktur (18) angeordnet. Vorteilhaft wird für die Schicht (24) der Gegenelektrode ein Material vorgesehen, das bei seinem Aufbringen auf die Schicht (22) der Tunnelbarriere mit deren Material praktisch nicht reagiert. Als Material für die Schicht (24) der Gegenelektrode kann insbesondere eine Molybdän-Rhenium-Legierung vorgesehen werden. (31 28 982)

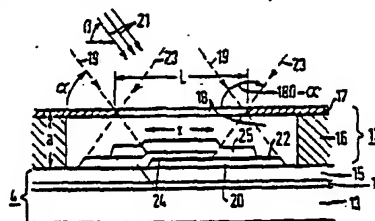


FIG 5

DE 3128982 A1

Patentansprüche

④. Verfahren zur Herstellung mindestens eines Josephson-Tunnelelementes, insbesondere für Logik- und Speicherschaltungen, das eine auf einem Substrat abgeschiedene supraleitende Schicht einer Basiselektrode, eine Schicht einer Gegenelektrode aus einem supraleitenden Material mit einer sehr geringen Spannungsrelaxation und mit einer mindestens so hohen Sprungtemperatur wie die von Niob sowie eine Schicht einer Tunnelbarriere zwischen den Elektrodenschichten enthält, bei welchem Verfahren in einem ununterbrochenen Vakuumprozeß die Schichten der Elektroden mit Hilfe einer Maskentechnik durch schräges Aufdampfen aufgebracht werden und zwischendurch die Schicht der Tunnelbarriere ausgebildet wird, dadurch gekennzeichnet, daß auf dem Substrat (4) eine Lochmaske (12; 27; 37) vorbestimmter Dicke (a) mit einer dem zu erzeugenden Tunnelelement angepaßten Lochstruktur (18; 30, 31; 43) angeordnet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Lochmaske aus einer auf dem Substrat (4) abzuschheidenden Sockelschicht (16; 28) und einer auf deren freier Flachseite aufzubringenden Deckschicht (17; 29) aufgebaut wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß für die Sockelschicht (16) und die Deckschicht (17) der Lochmaske (12) Polysilizium bzw. Aluminium vorgesehen werden.

4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß für die Sockelschicht (28) und die Deckschicht (29) der Lochmaske (27) Aluminium bzw. Polysilizium vorgesehen werden.

20781

2

-18- VPA 81 P 75 4 2 DE

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, da -  
durch gekennzeichnet, daß in der  
Lochmaske (12; 27; 37) Löcher (18; 30, 31; 43) ausge-  
bildet werden, deren Ausdehnung in der Sockelschicht  
5 (16; 28) gegenüber der Ausdehnung in der Deckschicht  
(17; 29) stufenförmig vergrößert ist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, da -  
durch gekennzeichnet, daß die  
10 Löcher (18; 30, 31; 43) in der Lochmaske (12; 27; 37)  
durch eine Fotolack-Maskentechnik und anschließende  
Ätztechnik ausgebildet werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, da -  
15 durch gekennzeichnet, daß die  
Lochmaske (12; 27; 37) nach Ausbildung der Schichten  
(20, 22, 24) des Tunnelelementes wieder entfernt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, da -  
20 durch gekennzeichnet, daß für die  
Schicht (24) der Gegenelektrode ein Material vorgesehen  
wird, das bei seinem Aufbringen auf die Schicht (22)  
der Tunnelbarriere mit deren Material praktisch nicht  
reagiert.

25 9. Verfahren nach Anspruch 8, da durch ge-  
kennzeichnet, daß als Material für die  
Schicht (24) der Gegenelektrode eine Molybdän-Rhenium-  
Legierung vorgesehen wird.

30 10. Verfahren nach Anspruch 9, da durch ge-  
kennzeichnet, daß eine Legierung mit einer  
Rhenium-Konzentration zwischen 10 Atom-% und 30 Atom-%  
vorgesehen wird.

35 11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, da durch

~~-19-~~ VPA 81 P 754 2 DE

g e k e n n z e i c h n e t , daß die beiden Komponenten der Legierung ratengeregelt aufgedampft werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11,  
5 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß die Schicht (22) der Tunnelbarriere durch Oxidation von Teilen der Oberflächenschicht der Basiselektrode (20) erzeugt wird.
- 10 13. Verfahren nach Anspruch 12, d a d u r c h g e - k e n n z e i c h n e t , daß die Oxidation durch Beschuß mit Sauerstoffionen durchgeführt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13, d a d u r c h g e -  
15 k e n n z e i c h n e t , daß den Sauerstoffionen Argon-Ionen beigemischt werden.
15. Verfahren zur Herstellung von mindestens zwei Josephson-Tunnelementen eines Interferometers nach  
20 einem der Ansprüche 1 bis 14, d a d u r c h g e - k e n n z e i c h n e t , daß vor dem Aufbringen der Schicht für die Gegenelektroden die Schicht der Basiselektroden oder die Schicht der Tunnelbarrieren bis auf die Bereiche der auszubildenden Tunnelemente  
25 mit einer Isolationsschicht abgedeckt werden.
16. Verfahren zur Herstellung von mindestens zwei Josephson-Tunnelementen eines Interferometers nach einem der Ansprüche 1 bis 15, d a d u r c h g e -  
30 k e n n z e i c h n e t , daß eine Lochmaske (45) mit mehreren sich kreuzenden, streifenförmigen Löchern (46 bis 48; 49, 50) vorgesehen wird und daß zwischen den Aufdampfschritten für die Schichten (52, 53 und 55 bis 57) der Elektroden die Lochmaske (45) bezüglich  
35 einer Aufdampfungsquelle so verdreht wird, daß in den

0120002  
22.07.81

4

~~-20-~~ VPA 81 P 75 42 DE

Kreuzungsbereichen (59 bis 61) der Löcher (46 bis  
48; 49, 50) die Tunnelelemente entstehen.

SIEMENS AKTIENGESSELLSCHAFT  
Berlin und München

Unser Zeichen  
VPA 81 P 7 5 4 2 DE

5 Verfahren zur Herstellung mindestens eines Josephson-Tunnelementes

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung mindestens eines Josephson-Tunnelementes, insbesondere für Logik- und Speicherschaltungen, das eine auf einem Substrat abgeschiedene supraleitende Schicht einer Basiselektrode, eine Schicht einer Gegenelektrode aus einem supraleitenden Material mit einer sehr geringen Spannungsrelaxation und mit einer  
15 mindestens so hohen Sprungtemperatur wie die von Niob sowie eine Schicht einer Tunnelbarriere zwischen den Elektrodenschichten enthält, bei welchem Verfahren in einem ununterbrochenen Vakuumprozeß die Schichten der Elektroden mit Hilfe einer Maskentechnik durch  
20 schräges Aufdampfen aufgebracht werden und zwischen- durch die Schicht der Tunnelbarriere ausgebildet wird. Ein derartiges Verfahren ist aus der Veröffentlichung "SQUID '80 - Superconducting Quantum Inter-  
ference Devices and their Applications", Berlin 1980,  
25 Seiten 399 bis 415 bekannt.

Von Josephson-Tunnelementen, die man insbesondere für hochintegrierte Logik- und Speicherschaltungen in beispielsweise 1- bis 2-Mikrometer-Technik vor-  
30 sehen möchte, wird gefordert, daß ihre Kennlinien gegenüber Abkühl- und Aufwärmzyklen zwischen Raumtemperatur und Supraleitungstemperatur weitgehend stabil sind und daß ihre Leckströme bei Spannungen kleiner als die Summe der Energielücken der das Element  
35 bildenden supraleitenden Schichten möglichst klein sind.

Slm 2 Hag / 26.6.1981



22.07.81

6

- VPA 81 P 7 5 4 2 DE

Mit dem aus der genannten Literaturstelle "SQUID '80" bekannten Verfahren lassen sich Josephson-Tunnelemente herstellen, welche die geforderte Stabilität gegenüber den erwähnten thermischen Zyklen aufweisen.

- 5 Dieses auch als Schwebemaskenverfahren bezeichnete Verfahren umfaßt im wesentlichen zwei Verfahrensschritte. Danach erfolgt zunächst die sogenannte Lithographie, d.h. die Herstellung einer Schattenmaske, und dann das eigentliche Aufdampfen der supra-
- 10 leitenden Schichten. Die Schwebemaske ist über einen einige zehntel µm hohen Sockel fest mit einem Substrat verbunden, das hauptsächlich aus Silizium besteht. Sie ist so unterhöhlt, daß freitragende, den geometrischen Formen der Schichten des herzustellenden
- 15 Josephson-Tunnelementes angepaßte Brücken ausgebildet sind. Mit Hilfe dieser Maskenstruktur werden dann in einer Hochvakuumanlage die Schichten des Tunnelementes aufgebracht bzw. ausgebildet. Dazu werden zwei als Basis- und Gegenelektrode dienende
- 20 Schichten aus supraleitendem Material unter verschiedenen Winkeln auf die Schwebemaske aufgedampft, und zwar so, daß sich die beiden Schichten unter der Brücke in vorbestimmter Weise überlappen. Als Material der Elektroden-schichten ist Niob vorgesehen,
- 25 das zum einen eine verhältnismäßig hohe Sprungtemperatur hat und zum anderen eine sehr geringe Spannungsrelaxation (vgl. z.B. DE-AS 21 63 250) aufweist. Zwischen den Aufdampfprozessen wird die erforderliche Tunnelbarriere durch Oxidation der freien Oberfläche
- 30 der als Basiselektrode dienenden ersten Niob-Schicht erzeugt. Auf diese Weise entsteht in der Überlappungszone der beiden Niob-Metallschichten das Tunnelement, ohne daß man die Vakuumbedingungen bei dessen Herstellung unterbrechen muß.

22.07.81

7

-X VPA 81 P 7542 DE

Es zeigt sich jedoch, daß die Leckströme von nach diesem bekannten Schwebemaskenverfahren hergestellten Josephson-Tunnelementen noch verhältnismäßig hoch sind. Ferner ist die Herstellung hochintegrierter Logikschaltungen

5 mittels dieses Verfahrens erschwert, da die Stabilität der hierfür vorzusehenden Schwebemasken wegen ihrer Unterhöhlungen begrenzt ist. Dies bedingt eine entsprechende Begrenzung der Integrationsdichte an Josephson-Tunnelementen. Außerdem ist bei dem bekannten Verfahren

10 die Oxidation der Basiselektrodenschichten zur Ausbildung der Tunnelbarrieren unter den Brücken der Maske verhältnismäßig schwierig auszuführen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es deshalb, das

15 bekannte Verfahren der eingangs genannten Art dahingehend zu verbessern, daß mit ihm die erwähnten Forderungen weitgehend zu erfüllen und die genannten Schwierigkeiten zu umgehen sind. Demnach sollen insbesondere mit dem Verfahren auch hochintegrierte Logikschaltungen mit

20 Josephson-Tunnelementen auf verhältnismäßig einfache Weise zu erstellen sein, wobei die Tunnelemente jeweils verhältnismäßig kleine Leckströme aufweisen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß

25 auf dem Substrat eine Lochmaske vorbestimmter Dicke mit einer dem zu erzeugenden Tunnelement angepaßten Lochstruktur angeordnet wird.

Die Lochmasken-Lithographie bei dem Verfahren nach der

30 Erfindung unterscheidet sich von der bekannten Schwebemasken-Lithographie im wesentlichen dadurch, daß ein Loch die Funktion der schwebenden Maskenteile übernimmt.

-A- VPA 81 P 7 5 4 2 DE

Die mit dem Verfahren nach der Erfindung verbundenen Vorteile sind dann insbesondere darin zu sehen, daß sich mit der Verwendung der besonderen Lochmaske und des besonderen Materials für die Gegenelektrode die Sauberkeit bei der Herstellung der Schichten des Josephson-Tunnelementes bedeutend erhöhen läßt. D.h., die Löcher der Maske lassen sich besser reinigen als die unter Brücken einer Schwebemaske liegenden Oberflächenteile. Außerdem erfährt die Schicht der Tunnelbarriere keine wesentliche Veränderung bei den ständig unter Hochvakuumbedingungen durchzuführenden Verfahrensschritten; insbesondere tritt keine Interdiffusion mit der sie abdeckenden Schicht der Gegenelektrode auf. Derartige Veränderungen der Tunnelbarrierschicht werden als eine Ursache für die Erhöhung der Leckströme angesehen. Die Reproduzierbarkeit sowie die Kennlinien der Tunnelemente werden also gegenüber den bisher bekannten Elementen wesentlich verbessert. Da außerdem die Tunnelbarrieren nicht unter Brücken wie bei dem bekannten Schwebemaskenverfahren, sondern direkt in den Löchern ausgebildet werden, ist ihre Herstellung besonders einfach. Dabei können die Abstände zwischen benachbarten Löchern sehr klein gehalten werden, so daß eine hohe Integrationsdichte, d.h. eine große Anzahl von Tunnelementen pro Flächeneinheit, zu erreichen ist. Das Verfahren eignet sich deshalb besonders zur Herstellung hochintegrierter Logikschaltungen.

Vorteilhafte Weiterbildungen des Verfahrens nach der Erfindung gehen aus den Unteransprüchen hervor.

30

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung und deren Ausbildungen gemäß den Unteransprüchen wird auf die schematische Zeichnung Bezug genommen, in deren Fig. 1, 2 und 3, 4 die bekannte Schwebemasken-Technik bzw. die Lochmasken-Technik nach der Erfindung gegenübergestellt sind. In Fig. 5 sind die wesentlichsten Schritte des Verfahrens

- nach der Erfindung in einem Querschnitt durch ein Josephson-Tunnelement mit Lochmaske angedeutet, die in Fig. 6 als Schrägansicht veranschaulicht ist. In den Fig. 7 und 8 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel einer
- 5 derartigen Lochmaske in Schrägansicht bzw. als teilweise Querschnitt dargestellt. Fig. 9 zeigt als Schrägansicht die Herstellung der supraleitenden Elektroden-schichten eines Josephson-Tunnelementes, während aus den Fig. 10 und 11 eine besondere Ausführungsform einer
- 10 Lochmaske bzw. deren räumliche Anordnung bei dem Verfahren nach der Erfindung hervorgeht. Die Fig. 12 bis 14 zeigen als Aufsicht Einzelheiten eines erfindungsgemäß herzustellenden Interferometers.
- 15 Zur Herstellung eines Josephson-Tunnelementes werden gemäß der bekannten, in Fig. 1 als Querschnitt angedeuteten Schwebemasken-Technik durch schräges Aufdampfen zwei sich einander überlappende, supraleitende Metallschichten 2 und 3 als Basis- bzw. Gegenelektrode auf
- 20 einem im allgemeinen aus mehreren Schichten aufgebauten Substrat 4 aufgebracht, wobei außerdem zumindest in der Überlappungszone dieser beiden Elektroden eine in der Figur nicht ausgeführte, als Tunnelbarriere dienende Schicht ausgebildet wird. Die geometrischen Formen der
- 25 Elektroden werden durch Öffnungen 5 und 6 und eine dazwischen ausgebildete Brücke 7 einer sich in einem Abstand  $a'$  über dem Substrat 4 befindenden Schwebemaske 8 unter Berücksichtigung eines Aufdampfwinkels  $\alpha'$  festgelegt. Diese in Fig. 2 auch als Aufsicht angedeutete
- 30 Schwebemaske 8 wird von einem auf dem Substrat 4 angeordneten Sockel 9 getragen, der im Bereich des zu erstellenden Josephson-Tunnelementes, beispielsweise durch Unterrätzen, eine entsprechende Aussparung aufweist. Die seitliche Begrenzung dieser Aussparung ist mit 10
- 35 bezeichnet. Bei einer Länge  $L'$  und Breite  $B'$  der Brücke 7 kann dann bei dem Aufdampfwinkel  $\alpha'$  bezüglich der Ebene der zu bedampfenden Substratoberfläche unter der Brücke

-8- VPA 81 P 75 4 2 DE

7 ein Josephson-Tunnelement mit einer Fläche  $F' = B' \cdot X' = B' \cdot (2a' \cotg \alpha' - L')$  seiner Überlappungszone ausgebildet werden. Die Länge  $L'$  ist dabei kleiner als  $2a' \cdot \cotg \alpha'$ .

5

In den Fig. 3 und 4 ist entsprechend den Fig. 1 und 2 die Lochmasken-Technik des Verfahrens nach der Erfindung angedeutet, wobei entsprechende Teile mit den gleichen Bezugszeichen versehen sind. Gemäß dem Querschnitt der

- 10 Fig. 3 soll ein Loch 11 einer auf dem Substrat 4 aufgetragenen Maske 12 eine Länge  $L$  und eine Breite  $B$  haben. Die Dicke der Lochmaske ist mit  $a$  bezeichnet. Bei einem Aufdampfwinkel  $\alpha$  ergibt sich dann eine Fläche der Überlappungszone des Josephson-Tunnelementes mit seinen
- 15 beiden Elektroden 2 und 3 zu  $F = B \cdot X = B \cdot (L - 2a \cotg \alpha)$ . Dabei ist die Länge  $L$  größer  $2a \cdot \cotg \alpha$ .

- Als Beispiel soll der zur Herstellung von einer  $1,5 \mu\text{m} \cdot 1,5 \mu\text{m}$  großen Überlappungszone eines Josephson-Tunnelementes mit etwa  $1 \mu\text{m}$  langen Elektroden
- 20 erforderliche Raumbedarf bei dem bekannten, in den Fig. 1 und 2 angedeuteten Verfahren mit dem Raumbedarf bei dem in den Fig. 3 und 4 angedeuteten Verfahren nach der Erfindung verglichen werden. Unter Zuhilfenahme der genannten Formeln läßt sich dann nachweisen, daß bei Anwendung einer bekannten  $1,5 \mu\text{m}$ -Lithographie zur Erzeugung einer Schwebemaske etwa 3 mal so viel Platz benötigt wird wie bei Verwendung einer Lochmaske gemäß dem Verfahren nach der Erfindung. Hieraus ist ersichtlich,
- 30 daß die Packungsdichte der Löcher und deshalb auch die der Tunnelemente sehr hoch gewählt sein kann, d.h., das Lochmasken-Verfahren ist insbesondere zur Herstellung von hochintegrierten Logikschaltungen geeignet.

- 35 D1 Herstellung eines Josephson-Tunnelementes nach dem erfindungsgemäßen Verfahren umfaßt im wesentlichen zwei

20781

M

-7- VPA 81 P 7542 DE

Verfahrensschritte, nämlich zunächst den Aufbau einer Lochmaske und daran anschließend die Ausbildung des Tunnelelementes. Beide Verfahrensschritte sind in dem in Fig. 5 dargestellten Querschnitt schematisch angedeutet. Gemäß dem ersten Verfahrensschritt wird eine Lochmaske 12 auf einem Substrat 4 erstellt. Das Substrat enthält einen scheiben- oder plattenförmigen Trägerkörper 13, beispielsweise aus Silizium, auf dem eine als Grundebene für eine Logikschaltung dienende Schicht 14 aus supraleitendem Material wie z.B. aus Niob mit einer Dicke von wenigen 100 nm aufgedampft ist. Diese Grundebene wird ihrerseits mit einer Isolierschicht 15 von wenigen 100 nm Dicke bedeckt. Diese beispielsweise aus Si, SiO oder SiO<sub>2</sub> bestehende Schicht kann zweckmäßig in einem Niedrigtemperaturverfahren abgeschieden werden, bei dem die darunterliegende Niobschicht 14 nicht angegriffen wird. Die Isolierschicht isoliert das aufzubringende Schaltelement von der supraleitenden Grundebene 14 und dient zum Transport schneller Schaltsignale in Gestalt des Dielektrikums von Streifenleitern, die aus der Grundebene und supraleitenden Verbindungsleitungen des Josephson-Elementes gebildet werden. Durch die Auswahl eines geeigneten Materials der Isolierschicht kann diese auch als Tiefenbegrenzung für eine nachfolgende Plasma-ätzlithographie bei der Herstellung der Lochmaske 12 verwendet werden. Diese Maske läßt sich dadurch ausbilden, daß man zunächst einen Sockel 16, beispielsweise aus Polysilizium, auf der Isolierschicht 15 des Substrats 4 mit einer Dicke von etwa 1 bis 3 µm aufbringt. Das Polysilizium kann beispielsweise mittels der sogenannten C.V.D.-Technik bei etwa 700 K abgeschieden werden. Daran anschließend kann gegebenenfalls eine Implantation von P oder B und in Tempern bei etwa 1100 K vorgenommen werden, um eine feinkörnige Polysiliziumschicht von geringer Oberflächenrauigkeit zu erzeugen. Auf den so erstellten

22.07.81

12

~~8~~ VPA 81 P 754 2 DE

- 5 Sockel 16 wird dann noch eine Deckschicht 17, beispielsweise aus Aluminium, mit einer Dicke zwischen 0,1 und 0,2  $\mu\text{m}$  aufgebracht. Anschließend wird in bekannter Weise diese Deckschicht 17 mit einem Fotolack bedeckt, der durch eine Maske kontaktbelichtet wird, die auf dem Lack unmittelbar aufgebracht wird und eine den geometrischen Formen des herzustellenden Josephson-Tunnelementes angepaßte Lochstruktur hat. Nach dem Entwickeln der belichteten Teile des Fotolacks wird eine
- 10 Lochstruktur in der Lackschicht von gleicher Geometrie wie die Lochstruktur der Maske erhalten. In den Lacklöchern wird dann die Deckschicht 17 aus Aluminium beispielsweise durch Plasmaätzen entfernt, so daß sich eine Lochstruktur mit der Länge L ergibt. Die verbleibenden
- 15 Lackschichten können danach in einem Trockenätzprozeß oder in einem Lösungsmittel ebenfalls entfernt werden. Anschließend wird das Material des Sockels im Loch der Deckschicht 17 mittels eines Trockenätzprozesses weggeätzt. Dabei wird vorteilhaft das in der Figur dargestellte Unterätzprofil erzeugt, d.h. die Länge der Lochstruktur in dem Sockel 16 ist größer als die Länge L des Loches in der Deckschicht 17. Durch dieses Unterätzen des unmittelbar an das Substrat angrenzenden Sockels läßt sich eine definierte Begrenzung der aufzubringenden Schichten des Tunnelementes erreichen.
- 20 Außerdem wird ein späteres Entfernen der Lochmaske von dem Substrat erleichtert. Das Unterätzen kann man z.B. dadurch ermöglichen, daß man einen Sockel mit erhöhter Ätzrate unmittelbar am Substrat benutzt. Eine Erhöhung
- 25 der Ätzrate läßt sich beispielsweise dadurch erreichen, daß für den Sockel ein anderes Material als für die auf ihm aufgebraute Deckschicht verwendet wird oder daß er gegenüber dem Material dieser Deckschicht unterschiedlich dotiert ist.
- 30

- VPA 81 P 7542 DE

Die so auf dem Substrat 4 erhaltene Lochmaske 12 mit einer Lochstruktur 18 und einer Dicke  $a$  wird dann in einer Ultrahochvakuumanlage auf einen drehbaren, kühl- und aufheizbaren Halter montiert. Dieser Halter läßt sich so drehen, daß die Aufdampfrichtung des Materials für eine als Basiselektrode dienende Schicht, für die insbesondere Niob gewählt wird, mit der Ebene der zu bedampfenden Oberfläche des Substrates einen Winkel  $\alpha$  bildet. Als weiterer Verfahrensschritt des Verfahrens nach der Erfindung wird dann bei einem Druck unter  $10^{-9}$  Torr, wie in der Figur durch gepfeilte Linien 19 angedeutet ist, auf das Substrat 4 eine Schicht 20 aus dem Material der Basiselektrode mit einer Dicke von etwa etwa 100 nm aufgedampft, wobei das Substrat auf einer Temperatur zwischen etwa 70 K und 1000 K gehalten wird. Zur anschließenden Ausbildung einer Tunnelbarrierschicht durch Oxidation der Oberfläche der Schicht 20 der Basiselektrode durch Beschuß mit Sauerstoffionen wird der Halter bis zu einer Temperatur zwischen Raumtemperatur und etwa 70 K abgekühlt. Er wird dabei so ausgerichtet, daß die Substratoberfläche mit einer Ionenkanone einen Winkel  $\beta$  mit  $\alpha \leq \beta \leq 180 - \alpha$  bildet. Als in der Figur nicht dargestellte Ionenkanone wird zweckmäßig eine Ionenquelle gewählt, die eine hohe Strahlstromdichte und Homogenität des Strahls gewährleistet. Die Energie der erzeugten Ionen oder Atome soll dabei zwischen etwa 100 eV und 1500 eV einstellbar sein. Hierzu können in Abänderung der bekannten Ausführungsformen von Ionenquellen Beschleunigungsblenden für einen reduzierten Durchsatz verwendet werden, um einen größeren Druckgradienten zwischen Plasma und Aufdampfraum zu ermöglichen. Die Art der in der Figur durch gepfeilte Linien 21 dargestellten Teilchenstrahlen ist definiert durch das gewählte Gas oder Gasgemisch im Entladungsraum der Ionenquelle. Die Ionenkanon wird differenziell gepumpt. Durch einen



20-07-81

14

~~-40-~~ VPA 81 P 7 5 4 2 DE

Sauerstoffionenstrahl, dem wahlweise Argonionen beige-  
misch sein können, wird dann die aufgedampfte Niob-  
schicht 20 der Basiselektrode bei einem  $10^{-6}$  Torr  
nicht überschreitenden Druck an ihrer Oberfläche  
5 oxidiert, so daß sich auf ihr eine dünne, als Tunnel-  
barriere wirkende Oxidschicht 22 ausbildet. Der Druck  
bei der Oxidation wird z.B. durch geeignetes diffe-  
renzielles Pumpen der Ionenquelle eingestellt. Nach  
Abschluß der Oxidation wird der Systemdruck in weniger  
10 als 20 sec wieder auf einen Druck von höchstens  $10^{-9}$   
Torr abgesenkt und dann der Halter mit dem Substrat  
so gedreht, daß die Bedampfungsrichtung für das Mate-  
rial einer Gegenelektrode mit der Bedampfungsebene  
einen Winkel  $180^\circ$  bildet. Bei dem genannten Druck  
15 von höchstens  $10^{-9}$  Torr wird dann, wie in der Figur  
durch gepfeilte Linien 23 angedeutet ist, eine als  
Gegenelektrode dienende Schicht 24 mit einer Schicht-  
dicke aufgedampft, die größer ist als die der als  
Basiselektrode dienenden Schicht 20.

20 Als Material der Gegenelektrodenschicht 24 wird vor-  
teilhaft ein supraleitendes Material gewählt, das zum  
einen eine Sprungtemperatur hat, die mindestens so  
hoch wie die des Materials der Schicht 20 der Basis-  
25 elektrode ist. Außerdem soll dieses Material mit dem  
Material der Schicht 22 der Tunnelbarriere bei seinem  
Aufbringen praktisch nicht reagieren. Darüber hinaus  
werden vorteilhaft als Materialien für die beiden  
Elektroden Materialien gewählt, die nur eine sehr  
30 geringe Spannungsrelaxation zeigen (vgl. DE-AS  
21 63 250). Unter diesen Bedingungen lassen sich dann  
Veränderungen der Tunnelbarrierenschicht 22, die mit  
einer Erhöhung der Leckströme und einer Veränderung  
des kritischen Stromes des herzustellenden Tunnel-  
35 elem ntes verbunden sind, weitgehend vermeiden.

22.07.81

15

11- VPA 81 P 7 5 4 2 DE

Schließlich wird das so erstellte Josephson-Tunnelement mit einer Länge  $X$  seiner Überlappungszone, die  $L - 2a \cdot \cot \alpha$  beträgt, noch mit einer Isolierschicht 25, z.B. aus Siliziumoxid, versehen. Hierzu  
5 kann entweder das bedampfte Substrat aus dem Vakuumraum der Bedampfungsanlage ausgebaut werden, oder aber der Halter wird in der Anlage so gedreht, daß der Bedampfungsstrahl bezüglich der zu bedampfenden Substratebene unter einem Winkel von etwa  $90^\circ$  ver-  
10 läuft.

Gegebenenfalls kann zuletzt noch die nicht mehr erforderliche Lochmaske 12 wieder entfernt werden. Wenn der Sockel der Maske aus Silizium besteht, läßt sich  
15 hierfür z.B. ein naßchemisches Verfahren mit einer Pyrokatechol-Lösung einsetzen.

Falls erforderlich, können auf das so erstellte Josephson-Tunnelement noch weitere Schichten, z.B.  
20 zur Ausbildung von Steuerleitungen, aufgebracht werden. Auf eine Darstellung dieser Schichten wurde in Fig. 5 aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

In Fig. 6 ist in Schrägansicht von oben die Lochmaske  
25 12 nach Fig. 5 mit einer Deckschicht 17, z.B. aus Aluminium, und einem unterätzten Sockel 16, z.B. aus Polysilizium, veranschaulicht. Als Boden ist die noch nicht mit den supraleitenden Schichten des Josephson-Tunnelementes bedampfte Isolierschicht  
30 15 aus  $\text{SiO}_2$  des Substrates ersichtlich.

Eine weitere, für das Verfahren nach der Erfindung verwendbare Lochmaske geht aus der in Fig. 7 dargestellten Schrägansicht bzw. dem in Fig. 8 nur teilweise ausge-  
35 führten Querschnitt hervor. Diese Lochmaske 27 mit

-12- VPA 81 P 75 4 2 DE

einer Länge L und einer Breite B umfaßt einen im Gegensatz zu der Ausführungsform nach den Fig. 5 und 6 verhältnismäßig dünnen Sockel 28, beispielsweise aus Aluminium, der eine dickere Deckschicht 29, insbesondere aus Polysilizium, trägt. Wie auch bei der Lochmaske gemäß den Fig. 5 und 6 vorgesehen ist, hat bei der Lochmaske 27 das Loch 30 des Sockels 28 eine größere Ausdehnung als das Loch 31 der auf ihm aufgetragenen Deckschicht 29. Das Loch 30 kann beispielsweise durch Unterätzen der Deckschicht vergrößert sein. Durch dieses Unterätzen des unmittelbar an das Substrat angrenzenden Sockels 28 kann die Unterätztiefe beschränkt und die Stabilität der Lochmaske weitergehend verbessert werden.

Bei dem Verfahren nach der Erfindung ist es besonders vorteilhaft, wenn für das Material der Schicht der Gegenelektrode außer Niob eine Molybdän-Rhenium-Legierung verwendet wird. Insbesondere Legierungen mit einer Rhenium-Konzentration zwischen 10 und 30 Atom-% sind besonders geeignet. Die Supraleitungs-Übergangstemperatur dieser Legierung ist vorteilhaft mindestens so hoch wie die des Niobs. Ferner sind auch Spannungsrelaxationsprozesse mindestens so stark behindert wie in Niob-Schichten, da es sich um eine Legierung handelt, die zudem noch eine höhere Schmelztemperatur aufweist als Niob (vgl. DE-AS 21 63 250).

In Fig. 9 ist die Herstellung einer entsprechenden, als Gegenelektrode dienenden Schicht aus dem 2-Stoff-System Molybdän-Rhenium näher veranschaulicht, wobei mit Fig. 5 übereinstimmende Teile mit den gleichen Bezugszeichen versehen sind. Die Legierung der Gegenelektroden-schicht 24 wird dabei durch ratengeregeltes Aufdampfen aus getrennten, durch das jeweilige Mate-

22.07.81

17

~~-13-~~ VPA 81 P 7542 DE

- rial gekennzeichneten Quellen 33 und 34 unmittelbar auf der Schicht 20, 22 der Basiselektrode bzw. der Tunnelbarriere ausgebildet. Hierbei müssen die seitlichen Randzonen 35 und 36 aus jeweils nur einer
- 5 Komponente der Legierung am Rand der Deckschicht 24 durch besondere Formgebung der zu verwendenden Lochmaske 37 außerhalb des Bereichs 38 der Überlappungszone 38 von Grundsicht 20 der Basiselektrode und Deckschicht 24 der Gegenelektrode liegen. Zu diesem
- 10 Zweck können die Verdampfungsquellen 33 und 34 des 2-Stoff-Systems auf einer durch eine gestrichelte Linie 40 angedeuteten Geraden parallel zur Drehachse 41 der auf einem Substrat aufgetragenen Lochmaske angeordnet werden. Außerdem müssen die Abmessungen
- 15 der Lochmaske 37 quer zur Lochrichtung der Länge L ungleichmäßig sein, wobei die Lochabmessungen senkrecht zur Lochrichtung der Länge L entweder stetig oder, wie in der Figur als Alternative dargestellt, abgestuft zunehmen. In der Figur ist ferner noch die
- 20 Aufdampfungsquelle 42 für das beispielsweise Niob-Material der Basiselektroden-schicht angedeutet.

- Zu dem gleichen Zweck, nämlich der Vermeidung, daß Randzonen aus jeweils nur einer Komponente der Legierung der Deckschicht der Gegenelektrode in den Überlappungsbereich mit der Schicht der Basiselektrode zu liegen kommen, kann gemäß der Darstellung nach
- 25 Fig. 10 die Lochmaske auch mit einem kreuzförmigen Loch 43 ausgeführt sein. Die Maske soll sich dabei
- 30 in der y-z-Ebene eines rechtwinkligen x-y-z-Koordinatensystems erstrecken. Gemäß Fig. 11 sind dann die Verdampfungsquellen 33 und 34 des 2-Stoff-Systems gemäß Fig. 9 in der von dem Einheitsvektor  $\hat{n}$  und  $\hat{y}$  aufgespannten Ebene anzuordnen. Der Winkel  $\varphi$  zwischen
- 35 der durch eine gepfeilte Linie b angedeuteten Auf-

22.07.81

18

~~-44-~~ VPA 81 P 7 5 4 2 DE

- dampfrichtung und der y-z-Ebene der Lochmaske muß dabei so auf die Lochtiefe der Maske abgestimmt sein, daß nur der in y-Richtung liegende Arm des kreuzförmigen Loches 43 bedampft wird. Durch Drehen
- 5 um  $90^\circ$  um die x-Achse können dann zwei orthogonale Schichten erzeugt werden, die sich einander als Basis- und Gegenelektrode auf dem Kreuzungspunkt überlappen.
- 10 Bei den Darstellungen gemäß den Fig. 3 bis 11 zur Erläuterung des Verfahrens nach der Erfindung wurde davon ausgegangen, daß mit diesem Verfahren in einem ununterbrochenen Vakuumprozeß die Elektrodenschichten und die Tunnelbarrierenschicht nur eines einzigen
- 15 Josephson-Tunnelementes hergestellt werden sollen. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es jedoch in vorteilhafter Weise ebenso möglich, auch eine Vielzahl von solchen Elementen gleichzeitig zu erstellen.
- 20 So läßt sich beispielsweise mit der in Fig. 10 dargestellten Lochmaske mit kreuzförmigem Loch 43 ein Interferometer mit zwei Josephson-Tunnelementen herstellen. Hierzu dampft man zunächst eine Basiselektrodenschicht in der beschriebenen Weise unter einem
- 25 vorbestimmten, ersten Aufdampfwinkel auf und oxidiert gegebenenfalls diese Schicht, um eine Tunnelbarriere zu erhalten. Anschließend wird jedoch statt des Aufdampfens der Gegenelektrodenschicht unter einem vorbestimmten, zweiten Aufdampfwinkel eine Schicht aus
- 30 einem isolierenden Material unter diesem Winkel aufgebracht. Dann erst wird die Gegenelektrodenschicht aufgedampft, wobei dieselbe Aufdampfrichtung gewählt wird wie für die Basiselektrodenschicht. Es entstehen so zwei Josephson-Tunnelemente an den gegenüberliegenden
- 35 Enden eines der beiden sich rechtwinklig durchsetzenden

-15- VPA 81 P 75 42 DE

Schlitze des kreuzförmigen Loches 43 der Maske. Hierbei lassen sich zugleich auch die Anschlußleitungen an den beiden Josephson-Tunnelementen mit ausbilden. Bei dem beschriebenen Verfahren ist es prinzipiell möglich, die  
5 Oxidation der Basiselektrode zu der Tunnelbarriere sowohl vor dem Aufbringen der zusätzlichen Isolierschicht als auch danach vorzunehmen.

In den Fig. 12 bis 14 ist als Aufsicht eine weitere Aus-  
10 bildungsmöglichkeit eines Interferometers angedeutet. Dieses Interferometer soll beispielsweise drei Josephson-Tunnelemente aufweisen, die gemäß dem Verfahren nach der Erfindung gleichzeitig erstellt werden. Dementsprechend wird zunächst auf einem Substrat die in Fig. 12  
15 teilweise ausgeführte Lochmaske 45 mit einer Lochstruktur aus drei parallelen, streifenförmigen Löchern 46, 47 und 48 sowie mit zwei diese Löcher senkrecht kreuzenden, streifenförmigen Löchern 49 und 50 ausgebildet. An-  
20 schließend wird das Material der Basiselektroden, beispielsweise Niob, unter einem solchen Winkel aufgedampft, daß sich, wie aus Fig. 13 hervorgeht, lediglich in den Löchern 49 und 50 das Material abscheidet. Es entstehen so streifenförmige Schichten 52 und 53 auf dem Substrat. Nach Ausbildung der Tunnelbarrierschichten durch  
25 Oxidation der Schichten 52 und 53 und nach Drehung der Lochmaske um  $90^\circ$  wird gemäß Fig. 14 im wesentlichen nur in den Löchern 46 bis 48 das Material der Gegenelektroden, beispielsweise Molybdän-Rhenium, aufgedampft, so daß dort streifenförmige Schichten 55 bis 57 entstehen.  
30 Dabei ergeben sich in den mit 59 bis 61 gekennzeichneten Überlappungszonen der Schichten 52 und 53 mit den Schichten 55 bis 57 drei einzelne Josephson-Tunnelemente und gleichzeitig die Struktur eines Interferometers.

Anstelle der vorstehend beschriebenen Herstellung vollständiger Interferometerkreise kann man mit diesem Verfahren in einem Arbeitsgang auch Schaltelemente der sogenannten direktgekoppelten Logik fertigen. Bei diesen  
5 Elementen treten Widerstandsbahnen an die Stelle von supraleitenden Verbindungsleitungen zwischen Josephson-Tunnelementen.

- Bei den Ausführungsbeispielen des Verfahrens nach der  
10 Erfindung wurde davon ausgegangen, daß die Schichten der Tunnelbarrieren durch eine bestimmte Oxidation der freien Oberflächen der Basisелеktrodenschichten erzeugt wurden. Bei diesem Verfahren ist es jedoch ebensogut  
15 möglich, als Tunnelbarrieren Schichten aus anderen Materialien wie z.B. aus Siliziumoxid, Siliziumnitrid oder Siliziumcarbid zu verwenden. Diese Schichten werden in einem besonderen Aufdampfschritt auf den Basisелеktrodenschichten abgeschieden.
- 20 Ein besonderer Vorteil des Verfahrens nach der Erfindung ist es, daß mit ihm außer der Herstellung einzelner Josephson-Tunnelemente oder Interferometer bei einer geeigneten Strukturierung einer Lochmaske auch die  
25 Josephson-Elemente oder Interferometer ganzer Logikschaltungen oder Teile solcher Schaltungen ohne Unterbrechung der Vakuumbedingungen gleichzeitig entsprechend den beschriebenen Verfahrensschritten erstellt werden können.

16 Patentansprüche

14 Figuren

-21-  
Leerseite





22.07.81

2/2

81 P 7 5 4 2 DE

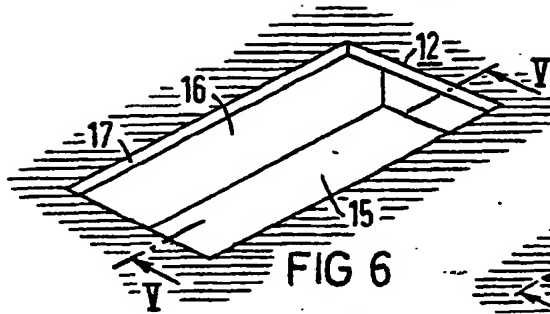


FIG 6

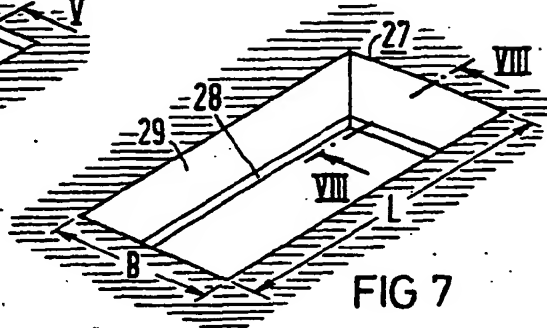


FIG 7

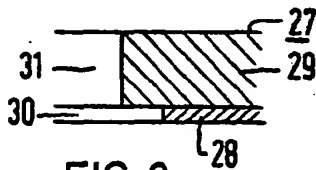


FIG 8

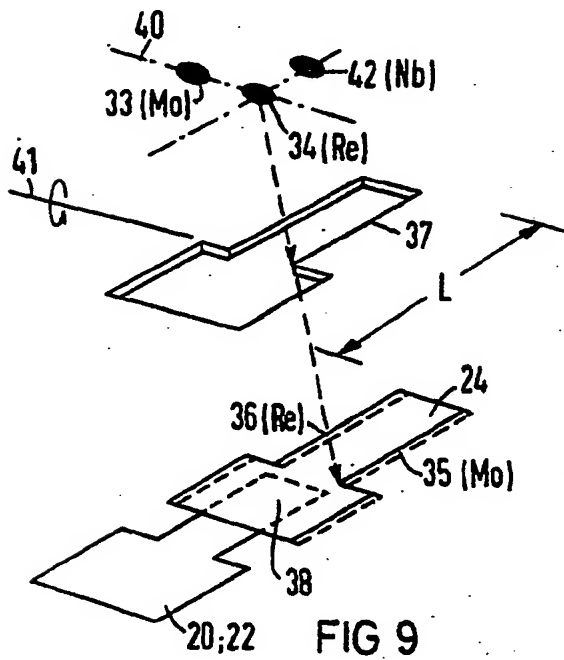


FIG 9

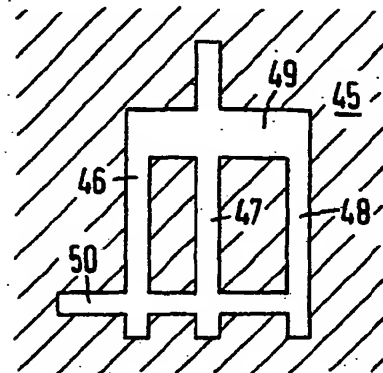


FIG 12

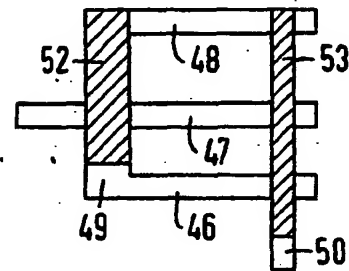


FIG 13

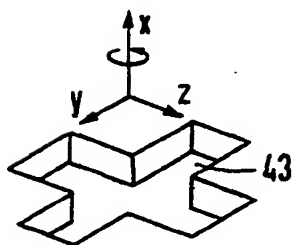


FIG 10

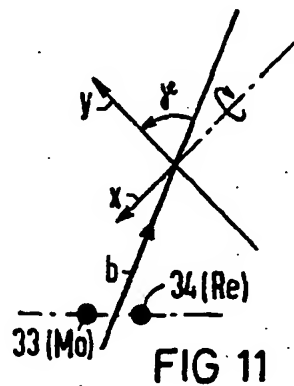


FIG 11

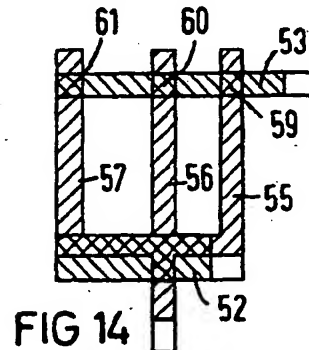


FIG 14